

рой охлаждающей воды на входе и выходе. Увеличение давления в три раза увеличивает интенсивность теплообмена не более 0,1 %;

– увеличение температуры воды на входе оказывает более существенное влияние, с повышением температуры воды её теплоемкость снижается, а значит и снижается количество тепла отданного охлаждающей воде.

В перспективе будут рассмотрены альтернативные конструкции фурм предполагающие наиболее оптимальное охлаждение.

#### Список использованных источников

1. Механика жидкостей и газов / В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко, Я.М. Гордон [и др.]: учебное пособие. – М.: Академкнига, 2003. – 464 с.

2. Теплотехнические расчеты металлургических печей / Под ред. А.С. Телегина. – М.: Металлургия, 1993. – 528 с.

УДК 662.76

**П. А. Ральников, Н. А. Абаимов, А. Ф. Рыжков**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

### ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГАЗИФИКАЦИИ В ПИЛОТНОМ КИСЛОРОДНОМ ПОТОЧНОМ ГАЗИФИКАТОРЕ

#### Аннотация

*Потребности металлургии в большом количестве электроэнергии целесообразно покрывать с использованием современных энергетических технологий, одной из которых является газификация твёрдого топлива. В докладе описывается численное исследование особенностей работы пилотного одноступенчатого кислородного газификатора ООО «НПО ЦКТИ» под давлением с сухой подачей угольной пыли. Численное моделирование работы установки проведено с использованием метода вычислительной гидродинамики CFD. Для сокращения времени расчёта геометрия исследуемого газификатора была упрощена до сегмента в 45 градусов. Произведено исследование расчетной сетки, выбрана наиболее оптимальная сетка для дальнейших расчетов. Произведено моделирование процесса поточной газификации и проанализированы результаты. Исследование показало, что в процессе газификации реагирующая смесь не достигает состояния химического равновесия, а значит требуется удлинение установки или закрутка потока.*

*Ключевые слова: газификация, вычислительная гидродинамика, уголь, кислородное дутьё, поточный газификатор.*

#### Abstract

*Metallurgy need of a large number of electricity is advisable to cover by the modern energy technologies, one of which is the solid fuel gasification. Numerical study of characteristics of pilot one-stage oxygen gasifier "NPO CKTI" under pressure with dry fuel delivery powdered solid fuel is described in the report. Numerical modeling of the units carried out using computational fluid dynamics (CFD) method. The geometry of the studied gasifier was simplified to the segment of 45 degrees for reducing of computation time. the research of computational grid was carried out, the optimal grid for further calculations was chosen. Modeling of the process flow gasification was carried out and the results was analyzed. The study showed that the gasification process does not achieve a full equilibrium in this plant. For the complete gasification is needed to do the plant longer or to add a swirling flow.*

*Keywords: gasification, CFD, solid fuel, oxygen-blowing, entrained-flow gasifier.*

## 1 Введение

Современная металлургия потребляет большое количество электроэнергии, что создаёт необходимость в достаточном количестве высокоэффективных и экологичных энергогенерирующих мощностей. Одной из наиболее перспективных энергетических технологий является парогазовая установка с внутрицикловой газификацией (ПГУ-ВЦГ) угля. Наиболее важный узел данной установки – поточный газификатор, в котором происходит конверсия пылеугольной смеси в горючий синтез-газ. Для создания высокоэффективного поточного газификатора перспективной высокомошной ПГУ-ВЦГ необходимы глубокие экспериментальные и числительные исследования. Исследованием процесса поточной газификации в Российской Федерации занимаются энергетики из НПО ЦКТИ с использованием собственной пилотной установки [1]. Зачастую для полного понимания процессов, происходящих в экспериментальных газификаторах, требуется использовать инструменты моделирования. Среди численных методов моделирования наиболее функциональным считается метод вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD).

Цель работы – численное исследование одноступенчатого поточного газификатора под давлением с сухой топливоподачей ООО «НПО ЦКТИ».

Для достижения цели необходимо решить ряд задач:

- 1) создать CFD модель, включающую в себя все необходимые подмодели;
- 2) произвести исследование расчетной сетки
- 3) проанализировать работу экспериментальной установки;

### 2 Описание экспериментальной установки

Газификатор представляет собой вертикально расположенный сосуд под давлением, в верхней части которого расположена камера газификации диаметром 0,21 м и высотой 1,6 м. В нижней части – камера охлаждения (секция водяного квенчинга и шлаковая ванна). Части соединены друг с другом водоохлаждаемым кольцом.

В верхнем торце газификатора установлены запально-стабилизирующее устройство, комбинированная прямоточная пылегазовая горелка и смотровое окно. Подогрев дутья до 350-550°C осуществляется в электронагревателе мощностью 10 кВт. Моделируемый режим работы данной установки приведен в Таблице 1.

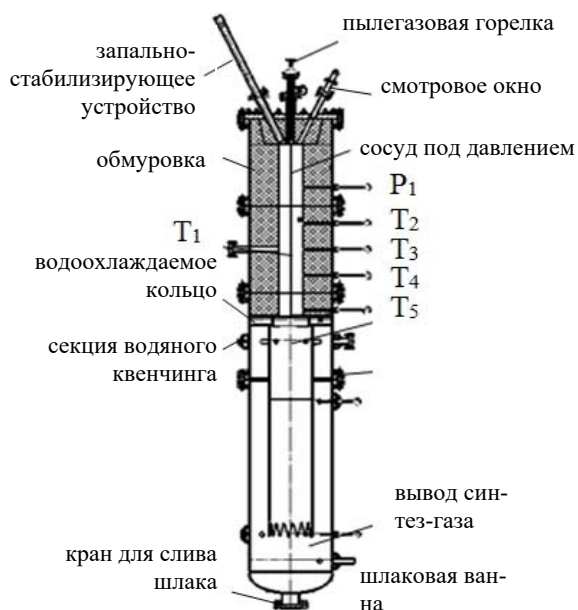


Рис. 1. Одноступенчатый газификатор ЦКТИ

Таблица 1  
Моделируемый режим работы газификатора

Параметр	Значение
Расход топлива, кг/ч	12
Марка топлива	Кузнецкий каменный уголь марки Д
Транспортирующий агент	Азот
Расход транспортирующего агента, кг/с	0,00042
Температура транспортирующего агента, °C	25
Состав дутья, об. %	O <sub>2</sub> = 96 N <sub>2</sub> =4
Расход дутья, кг/с	0,005
Температура дутья, °C	522
Рабочее давление, МПа	0,32

### 3 Процесс моделирования

Для расчета скоростных параметров движения потока внутри газификатора использовалась модель турбулентности  $k-\epsilon$  стандартного вида. Выбор данной модели был обусловлен характером движения рабочей среды. При моделировании физико-химических процессов в газификаторе использовались: диффузионно-кинетическая модель газификации твердого топлива, модель радиационного теплообмена Discrete Transfer Model, модель движения угольных частиц, и другие [2, 3]. Для упрощения расчетов не учитывались реакции диссоциации, а стенка принималась адиабатной.

Геометрия газификатора ЦКТИ обладает лучевой симметрией из-за восьми отверстий выхода окислителя в форсунке горелки. Поэтому для моделирования установки был выбран сегмент в  $45^\circ$ . Это позволило оптимизировать вычислительный процесс и сократить время расчёта.

### 4 Исследование расчетной сетки

Для обеспечения достаточной точности результатов расчетная сетка должна быть подробной, но при этом она не должна содержать в себе излишне большое количество элементов, так как это значительно увеличивает требования к ресурсам компьютера и время расчета. Для оптимизации расчетного процесса произведено исследование влияния количества расчетных элементов сетки на результаты исследования.

Исследование произведено на сетках в 50, 115, 180, 250, 530 тыс. элементов. Для сравнительного исследования были построены графики распределения молярной концентрации компонентов по высоте газификатора для расчетных сеток с различным количеством элементов (рис. 2).

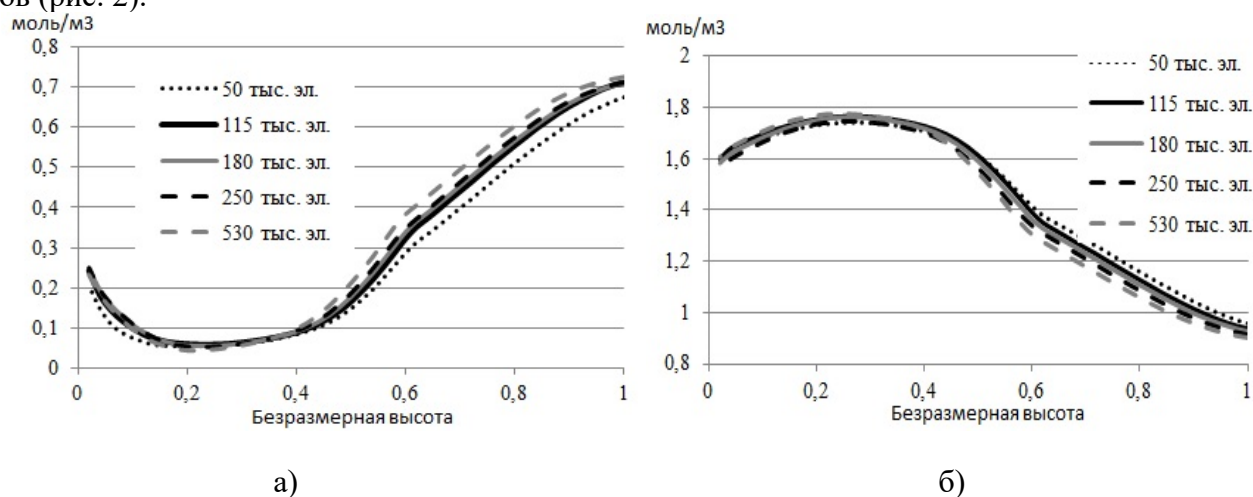


Рис. 2. Распределение основных параметров по высоте газификатора для различных сеток: а) молярная концентрация  $H_2$ ; б) молярная концентрация  $H_2O$

На рис. 2,а изображено распределение молярной концентрации водорода по высоте газификатора. В верхней половине установки результаты идентичны, а во второй части можно заметить, что результаты, полученные на сетке в 50 тыс. элементов, заметно отличаются от результатов на других сетках.

На рис. 2,б отражена зависимость молярной концентрации  $H_2O$  по высоте газификатора. Результаты расчета на сетках с 180, 250 и 530 тыс. элементов практически сходятся в одну линию. Этот факт свидетельствует о том, что расчеты на всех 3 сетках дают почти полностью идентичные результаты, а отличаются только временем расчета и требованиями к ЭВМ. Таким образом, для оптимизации процесса и времени расчета необходимо использовать расчетную сетку, содержащую 180 тыс. элементов.

### 5. Исследование процесса

Для исследования процесса был построен график распределения аксиальной скорости, суммы мольных концентраций, и объемной концентрации элементов по высоте газификатора.

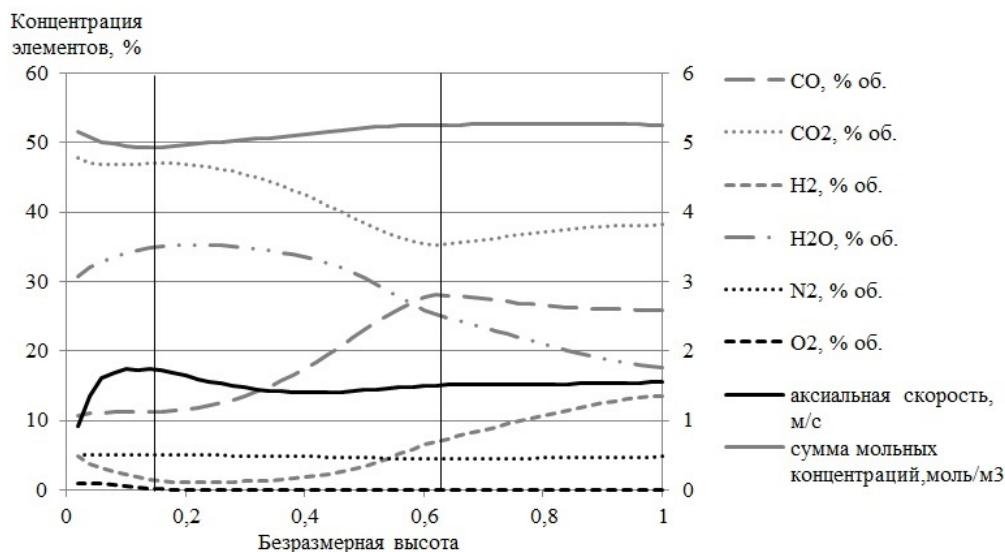


Рис. 3. Распределение переменных по высоте газификатора

Из графика видно, что реакции газификации развиваются во второй половине газификатора, где объемная концентрация CO и H<sub>2</sub> растет, а CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O снижается. Наблюдается рост содержания монооксида углерода от горелки и до 0,65 высоты установки. Процентное содержание водорода повышается от 0,25 и до выхода из газификатора, причем можно предположить, что водород будет расти и далее. Концентрация CO<sub>2</sub> снижается до 0,65 высоты. Процентное содержание H<sub>2</sub>O уменьшается на промежутке от 0,25 до 1 высоты.

Пик аксиальной скорости и минимум суммы мольных концентраций компонентов синтез-газа (0,14 высоты газификатора) совпадают с областью максимальных температур, что объясняется возрастанием относительного объема синтез-газа при росте температуры.

Процентное содержание компонентов H<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O не перестаёт меняться даже на выходе из газификатора, следовательно, длины установки не хватает для достижения равновесия. При такой организации процесса не хватает длины для завершения процесса газификации, следовательно, имеет смысл увеличение длины установки, либо добавления закрутки потока.

## 6. Заключение

Выполнено численное моделирование пилотной установки поточной газификации твердого топлива ООО «НПО ЦКТИ». Исследование сетки показало, что для получения достоверных результатов достаточно расчетной сетки с 180 тыс. элементами.

Численное исследование процессов, происходящих в газификаторе показало, что процесс газификации в установке не приходит к полному равновесию (содержание водорода продолжает расти, а H<sub>2</sub>O снижаться), следовательно, процесс газификации продолжает протекать даже в зоне у выхода из газификатора, что может свидетельствовать о необходимости удлинения установки или закрутки потока.

Исследование выполнено в Уральском федеральном университете за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00524).

## Список использованных источников

1. Abaimov N.A., Osipov P.V., Ryzhkov A.F. Experimental and computational study and development of the bituminous coal entrained-flow air-blown gasifier for IGCC // Journal of Physics: Conference Series, № 754, 2016, 112001, doi:10.1088/1742-6596/754/11/112001
2. Чернецкий М.Ю., Кузнецов В.А., Дектерев А.А., Абаймов Н.А., Рыжков А.Ф. Сравнительный анализ влияния моделей турбулентности на описание процессов горения уголь-

ной пыли при наличии закрутки потока // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23. № 4. С. 615-626.

3. Абаимов Н.А., Рыжков А.Ф. Разработка модели поточной газификации угля и отработка аэродинамических механизмов воздействия на работу газогенераторов // Теплоэнергетика. 2015. № 11. С. 3.

УДК 004.94

**П. А. Сеченов, В. П. Цымбал, А. А. Оленников**

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»,  
г. Новокузнецк, Россия

## **ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ГРАВИТАЦИОННОГО СЕПАРАТОРА И РАЗДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ ПЫЛЕВИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

### **Аннотация**

*В статье рассмотрены особенности имитационной модели гравитационного сепаратора колонного струйно-эмульсионного ректора. Созданная имитационная модель позволяет сократить стадию пред-проектного исследования и опытно-конструкторские работы и уменьшить затраты на создание опытных физических установок. Имитационная модель основана на использовании метода статистических испытаний Монте-Карло и «первых принципов». В качестве первых принципов рассматриваются дисперсные частицы шихты и продуктов реакций, а также возможные варианты их превращений и взаимодействий. Ядром этой модели является процесс обтекания конденсированной частицы вертикальным потоком газа. Алгоритм позволяет имитировать витание большого числа частиц в потоке несущего газа, в том числе с учетом столкновений частиц и обмена векторными значениями импульсов. На основе подобной методики создана имитационная модель вертикального гравитационного сепаратора для разделения компонентов пылевидных материалов. Приведен также пример данной методики для разделения очень мелкодисперсной пыли из газоочистки марганцевого производства на два ценных, ликвидных продукта.*

*Ключевые слова:* имитационное моделирование, гравитационный сепаратор, Монте-Карло, кипящий слой, двухфазный поток.

### **Abstract**

*The article considers features of the simulation model of the gravitational separator of the column jet-emulsion reactor. The simulation model allows reducing the stage of pre-design research and development work and reducing the cost of creating experimental physical facilities. The simulation model is based on the Monte Carlo method of statistical tests and the "first principles". As the first principles, disperse particles of batch and reaction products are considered, as well as possible variants of their transformations and interactions. The core of this model is the process of flow around a condensed particle by a vertical gas flow. The algorithm allows simulating the flow of a large number of particles in the flow of a carrier gas, including taking into accounting the collisions of particles and the exchange of vector values of the pulses. An imitation model of a vertical gravitational separator is created on the basis of this method for separation of components of pulverized materials. An example of this technique is also given for the separation of very fine dust from manganese gas purification into two valuable, liquid products.*

*Keywords:* simulation modeling, gravity separator, Monte Carlo, fluid bed, two-phase flow.

Представляемая статья является дальнейшим развитием многолетней работы коллектива ученых, производственников и проектировщиков, в процессе которой был создан и доведен до уровня крупномасштабной опытной установки на Запсибметкомбинате [1] новый ме-